自动化程度对飞行惊奇效应的影响：来自 ASRS 数据库的证据

杜磊[1,2] 王新野[3] 刘赛芳[1] 李颖[1] 游旭群[1*] 吴姚量[1,4] 刘章[1]

(1.陕西师范大学心理学院，西安 710062；2.西藏航空有限公司，成都 6102003；3.西北政法大学公安学院，西安 710122；4.中国东方航空安徽分公司飞行部，邮编：230031)

应用启示

本研究定量验证了自动化程度对飞行惊奇效应的影响并探讨了其影响机制。该研究拓展了惊奇效应的研究范围，并提示航空界应重视高等级自动化程度所带来的飞行安全风险，为制定科学的飞行惊奇效应应对方案提供依据，以满足以飞行员为中心的飞机自动化设计理念。

摘要

当自动化系统执行的行为与操作者的期待不一致时，就容易出现惊奇效应，会进一步对安全作业带来危害。通过挖掘美国航空安全报告系统(ASRS)数据库，得到了 281 起受自动化系统影响的飞行员惊奇事件。对这些事件进行系统性分析发现，高等级自动化程度容易对惊奇效应产生影响。此外，基于这些事件和文献，我们从人-机两方面探讨了自动化程度对惊奇效应的影响机制。最后，期待航空界重视自动化程度所带来的潜在安全风险。

关键词 自动化，自动化程度，惊奇效应，ASRS 数据库，航空安全

中图分类号 B849

DOI

* 通讯作者：游旭群，男，陕西师范大学教授，e-mail：youxuqun@snnu.edu.cn

The Impact of DOA on in-flight Surprise Effects: Evidence from the ASRS Database

DU Lei[1, 2] WANG Xinye[3] LIU Saifang[1] LI Ying[1] YOU Xuqun[1]

WU Yaoliang[1, 4] LIU Zhang[1]

(1.School of Psychology, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China; 2.Tibet Airlines Co., Ltd, Chengdu, China; 3.School of Public Security, Northwestern University of Politics and Law, Xi'an 710122, China; 4.Flight Department China Eastern Airlines Co., Ltd., Anhui Branch, Hefei, Anhui 230031, China)

Abstract

When the behavior of an automated system deviates from an operator's expectations, a surprise effect may occur, potentially compromising operational safety. An analysis of the U.S. Aviation Safety Reporting System (ASRS) database identified 281 instances of pilot surprise events triggered by automated systems. A systematic review of these incidents revealed that higher degrees of automation (DOA) are susceptible to the surprise effect. Additionally, drawing on these incidents and existing literature, we investigated the mechanisms through which DOA contributes to the occurrence of surprise effects from both human and machine perspectives. Finally, we underscore the importance of addressing the potential safety risks posed by high DOA within the aviation industry.

Key words: automation, degree of automation, surprise effect, intervention ASRS database, aviation safety

1 引言

自从 20 世纪 80 年代末首次投入使用的高度自动化“玻璃驾驶舱”商用飞机以来，飞行事故的频率有了显著下降，飞行安全得到了持续提升（Boeing, 2021）。然而，高级别的自动化系统也可能引入新的、非预期的错误模式（Billings, 1996）。长时间依赖自动化系统操作的飞行员可能会过分信任这些系统（自满），进而产生对自动化的依赖（Parasuraman & Manzey, 2010）。但当自动化系统未能如飞行员所期或根本未执行时，飞行员对系统的实际行为感到意外（Sarter et al., 1997; Woods & Hollnagel, 2006）。

当实际体验与先前的预期存在偏差时，人们对不符预期的事件的响应就会产生惊奇效应（Horstmann, 2006）。研究显示，前额叶和基底节在调节惊奇反应中起着重要作用（Wessel et al., 2016）。生理上，对于飞行员惊奇效应的反应可能包括心跳加速和血压上升；在认知层面，可能会出现意识模糊、情境意识缺失、忘记正在执行的操作（Rivera et al., 2014）以及工作记忆能力下降（Wessel et al., 2016）。心理上，惊奇效应会使得飞行员的注意力变得狭窄，心理工作负荷增加，情景意识下降，甚至在一定时间内失去对飞行的控制（European Aviation Safety Agency, 2018；International Air Transport Association, 2019; 王新野等，2021）。例如在两起波音 737MAX 坠机事故中，机动特性增强系统（Maneuvering Characteristics Augmentation System, MCAS）的非预期触发导致飞行员产生了惊奇效应，人和自动化交互失败，最终导致事故的发生（王新野等, 2024）。

de Boer 和 Hurts (2017)使用问卷调查了受自动化系统影响的飞行员惊奇效应，他们认为影响惊奇效应的因素包括：工作负荷、自动化等级、机组、飞行经验、操作强度、年龄、级别和疲劳等。程妮(2019)依据飞行员是否有控制动作输入，划分为控制输入型和监视无输入型，前者影响因素主要为自动化反馈缺陷、期望不正确等；后者影响因素主要为由“环外”问题导致的情景意识下降。综上，影响与自动化系统相关的惊奇效应的因素大体可分为两个方面：一是自动化系统方面，如传感器或其他自动化系统中未检测到的故障；自动化界面缺乏透明度，使其无法提供充分的有关自动状态的信息（Trippe & Mauro, 2015）。二是飞行员的心理因素方面，如情景意识丢失，自动化系统相关的知识匮乏等（de Boer & Hurts, 2017）。然而，自动化程度对惊奇效应的影响却缺乏相关的证据支持，而这也正是本研究所要解决的主要问题。此外，由于商业航空飞机在不同飞行阶段所使用的自动化程度不同，因此我们进一步假设飞行阶段也会对惊奇效应产生影响。

2 方法

从美国国家航空航天局的航空安全自主报告系统（Aviation Safety Reporting System, ASRS）数据库中我们可以获取飞行员的自主报告，从中可以挖掘出感兴趣的航空安全数据，并向航空安全领域传递出重要信息。有很多研究者利用 ASRS 数据库发现了一些飞行员与自动化系统交互过程中存在的问题（Musselman, 2019; Trippe & Mauro, 2015）；另外也有一些研究者利用 ASRS 数据库对飞行中的惊吓和惊奇效应进行了研究（Rivera et al., 2014；European Aviation Safety Agency, 2018）。这些研究也说明，使用 ASRS 数据库来研究飞行中飞行员惊奇效应是可行的。

2.1 与自动化相关的飞行员惊奇效应的筛选

针对 ASRS 数据库（https://asrs.arc.nasa.gov/search/database.html），本研究的检索标准和流程如图 1 所示（检索时间为 2022 年 3 月 1 日）：

自动化系统在不断地进行迭代，因此本文核心关注近十年来的与自动化相关的飞行员惊奇效应，因而事件的时间区间设置为 2010 年 1 月到 2021 年 12 月。

航空运行规则设置为 121 部（公共商业运输航空），这是因为在现阶段的民航运输活动中，商业运输航空所配备的自动化系统是最为齐全的，并且其操作标准和管理体系也是最健全的。在每个航班的飞行过程中，飞行员到哪个阶段该采用什么方式操作飞机都有标准流程。

人为因素设置为人机交互，这是为了最大程度地找到与自动化因素有关的案例。

文本叙述设置为与惊奇有关的词根（根据 Rivera 等人（2014）的建议将自定义检索关键词扩展为“surpri%”，“freez%”，“perplex%”，“confuse%”，“shock%”和“unexpect%”，符号“%”用于搜索派生词以实现更为彻底的检索），这是为了能够准确收集到飞行员惊奇效应的同时尽量减少手动筛选的工作量。

直接检索（Run Search）后得到 305 个事件并下载（文件为电子表格（Excel）格式）。

接下来，由两名民航在飞机长、一名民航在飞副驾驶、一名飞机电子设备设计专家和一名航空心理学的人因问题专家及两名航空心理学专业博士研究生组成的七人研究小组针对文本内容开展编码工作如下：

首先，两名机长和一名副驾驶基于案例文本判断飞行员是否经历了惊奇效应，例如飞机突然出现 GPWS 警告、飞机突然断开自动驾驶等，而后进一步确认惊奇效应是否受自动化系统影响。

其次，飞机电子设备设计专家根据机长筛选出的文本，进一步分析这些自动化系统是哪些

（例如自动化，自动驾驶，自动油门，飞行管理系统，飞行管理计算机，模式控制面板，水平导航（Lateral Navigation, LNAV），垂直导航（Vertical Navigation, VNAV）等），并排除掉与飞行控制系统无关的案例，最终得到了 281 个由自动化控制系统诱发的飞行员惊奇效应事件。例如“ACN 893287:在飞行中，两个主飞行显示器最初显示的空速正常，我们还是遭遇了抖杆警告。在接下来的几分钟内，我们遇到了一系列的警告和提醒以及数据冲突。这促使我立即增加最大动力并降低飞机的俯仰角。尽管进行了这些纠正措施，失速指示在下降过程中仍然持续，并伴随着大量的高度损失。这使我们困惑，并无法验证/解读仪表……”

最后，一名航空心理学的人因问题专家和两名航空心理学专业博士研究生基于文献内容，将由电子设备设计专家筛选出的惊奇事件划分于不同的自动化程度、飞行阶段和机型中。小组成员面对面同时开展这项工作，遇到有分歧情况直接进行沟通并形成统一意见。

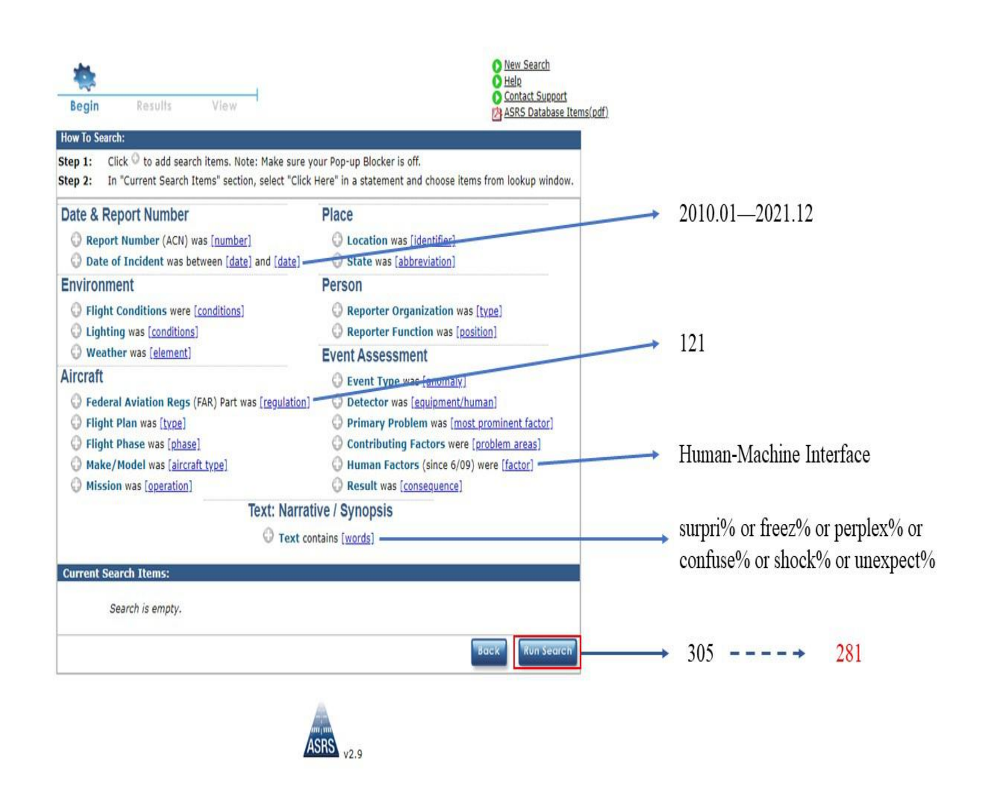


图 1 与自动化相关的行员惊奇效应的检索标准和流程

2.2 自动化程度的分类及相关因素

不同学者将手动（manual）到自主性（autonomy）之间分为不同的等级，以考察自动化程度对操作者心理和行为的影响（Vagia et al., 2016）。然而具体到机载自动化系统上，Moriarty（2015）根据当前主流商业运输飞机的操纵实际，又将飞行控制的自动化水平分成为 4 个等级（见表 1）。

手动飞行时，飞行员不借助任何自动化飞行控制系统（第 1 等级）；而 FD 开启后可以为飞行员提供飞行指引，提供操作参考（第 2 等级）；在 AP/AT 开启时，飞行员手动选择航向和航路点实现更便捷和精确的航路管理（第 3 等级）；借助 FMS 的引导，AP/AT 开启,飞机完全可以自主飞行（第 4 等级）。

表 1 自动化程度所对应的飞行控制模式

自动化程度	飞行控制模式
4	AP/AT 开启，FMS 引导
3	AP/AT 开启，手动选择
2	FD 开启，手动飞行
1	手动飞行

注：根据所使用的系统和模式将自动化程度分为 4 个等级 (Moriarty, 2015). AP = 自动驾驶（autopilot）；AT =自动油门（auto-throttle）；FD =飞行指引（flight director）；FMS =飞行管理系统（flight management system）。

当前商业运输民航飞机的操作都有标准操作程序，包括飞机自动化的使用。在航班运行中对于 1 到 4 等级的自动化程度每个航班都会用到：例如落地阶段采用全手动操作的第 1 等级，滑跑起飞和决断高度到着落阶段采取第 3 等级，在爬升阶段和最后进近阶段采取第 2 等级，剩余大部分时间的巡航阶段采用第 4 等级。结合 ASRS 中的事件可以很容易查明飞行员所采用飞行控制自动化系统，并确定出事件发生时的自动化程度等级。

2.3 数据分析

在本研究中，获取的数据类型均为可计数的称名数据，因此我们将使用 R3.6.3 软件对数据进行非参数（卡方）检验。

3 结果

3.1 自动化程度对飞行员惊奇效应发生率的影响

表 2 与自动化程度所对应的惊奇效应发生率

自动化程度	事件数目/n	% of total
4	137	49
3	87	31

2	37	13
1	17	6
其他	3	1
总计	281	100

表 2 显示，高级别的自动化程度与绝大多数的惊奇效应相关。具体来说，第 4 级和第 3 级的自动化程度所对应的惊奇效应占比为 80%，其中第 4 级自动化程度所对应的飞行员惊奇效应占比约为总数的一半。相对而言，第 2 级和第 1 级自动化程度所对应的飞行员惊奇效应的比例逐渐减少。卡方检验结果指出，惊奇效应发生的概率与自动化程度之间存在显著差异，自动化程度越高，对飞行员发生惊奇效应的影响可能性也就越大（$\chi^2_{(3)} = 124.82$， $p < .001$）。

3.2 飞行阶段对飞行员惊奇效应发生率的影响

表 3 与飞行阶段所对应的飞行员惊奇效应的发生率

飞行阶段	事件数目/n	% of total
驻泊	16	6
起飞	20	7
初始爬升	33	12
爬升	21	7
巡航	42	15
下降	35	12
初始进近	63	22
最终进近	46	16
降落	5	2
总计	281	100

注：由于数值四舍五入，故百分比可能不等于 100%

表 3 揭示，在巡航、下降和初始进近这三个飞行阶段，飞行员惊奇效应约占总事件的一半（49%），这三个阶段通常使用较高级别的自动化。此外，初始爬升和最终进近阶段所对应飞行员惊奇效应的比例也相对较高，具体原因将在讨论部分详细说明。卡方检验结果表明，不同飞行阶段的惊奇效应发生率存在显著差异（$\chi^2_{(8)} = 80.441$， $p < .001$），这表明飞行的不同阶段，飞行员惊奇效应的发生频率也有所不同。

4 讨论

结果表明，自动化程度越高，飞行员惊奇效应的发生率就会越高。从本文中“惊奇效应”的定义来看，自动化系统行为和飞行员的期待均可对惊奇效应造成直接性影响，然而自动化程度并不直接影响飞行员惊奇效应，那么自动化程度是通过什么中介变量来影响惊奇效应的呢？基于这 281 个案例并结合相关文献，本研究从人-机两条路径提出自动化程度对飞行员惊奇效应的影响机制（见图 2）：

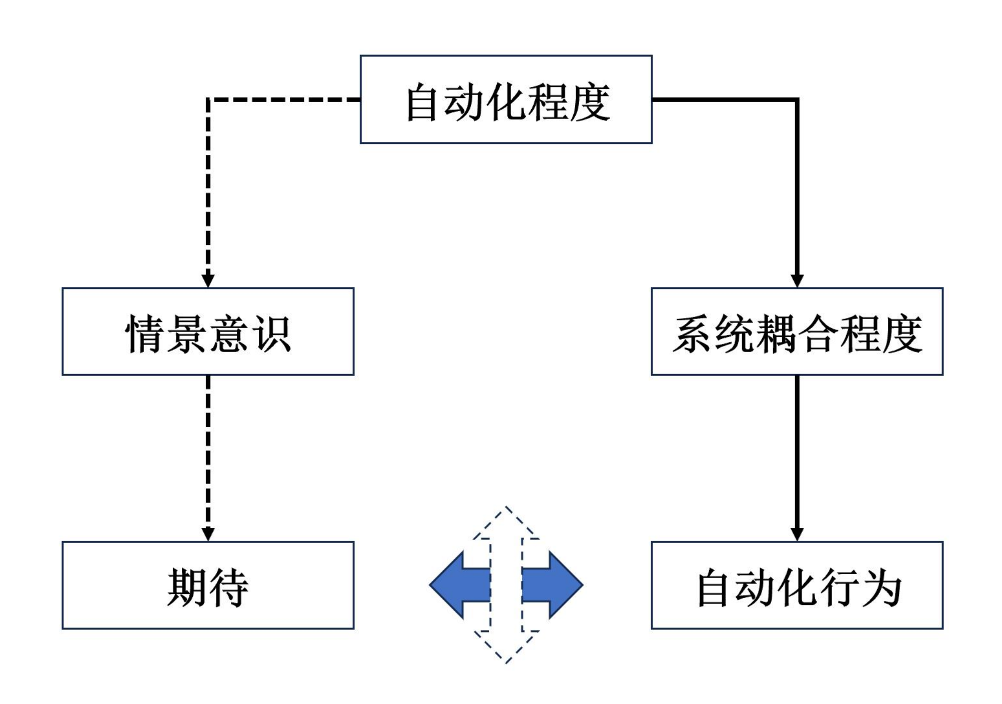


图 2 自动化程度对飞行员惊奇效应的影响机制

注：实心双箭头表示飞行员的期待与自动化行为匹配，没有发生惊奇效应；空心双箭头表示飞行员的期待与自动化行为失匹配，发生了惊奇效应。

高等级的自动化程度使飞行员对操控系统的卷入程度降低（人在环外），情景意识下降（Wickens, 2008），导致对自动化系统产生不正确的期待，惊奇效应发生（Ancel & Shih, 2015；许为, 2022）。这样的案例有 78 起，例如 ACN 1615387：在巡航过程中（第 4 级自动化程度），机组因长时间执勤而警觉性不足（情景意识下降），导致机组未能及时发现飞机实际飞行路径（自动化行为）与其最初在 MCDU 上设置的飞行路径（期待）发生偏离，进而导致惊奇效应的发生。

现阶段高自动化等级的功能实现通常需要依赖大量的子系统（模块），会导致系统耦合度变高，并进一步增加了系统的复杂度，降低了系统的稳定性。换句话说就是自动化系统的非预期行为可能会增多，提升了惊奇效应的发生概率。这样的案例有 203 起，例如 ACN939543：在巡航过程中（第 4 级自动化程度），ECAM 提示自动燃油供油故障（意外事件发生）。警报重复出现，而且 ECAM 没有进一步的步骤或程序提示可供遵循，读数如下：LO 7.4、RO 6.73、LI 0.0、CTR 6.67、RI 4.3、TRM 4.47。这相当令人震惊（惊奇效应发生），因为它表明存在严重的燃油不平衡，可能有燃油泄漏，而且按照 ECAM 操作后没有提供有意义的程序路径和配置。飞行员可能在“惊奇效应”下失去了对这一切的确切记忆。

在巡航阶段中，飞机主要处于自动驾驶模式，飞行人员执行了长时间的监控任务，因此他们的情景意识可能会下降。此外，从下降开始到初始进近，飞行员使用自动化系统的频率在增加，这也增加了飞行员惊奇效应出现的几率。而当最终进近和降落的时候，飞行员必须将自动驾驶（高自动化等级）切换至手动操作（低自动化等级），所以在降落阶段飞行员惊奇效应出现概率要小。

5. 研究展望

本文在前人研究的基础上，在 ASRS 数据库中拓展了关键词的搜索，扩展了事件的时间范围，最终得到了 281 起与自动化系统相关的飞行员惊奇效应的案例。虽然这些案例反映了飞行员对经历惊奇效应时的自然态度和反应，但是我们无法掌握飞行员经历惊奇效应时的情绪反应强度。研究表明飞行员的惊奇反应对飞行员应对飞行特情意义重大（European Aviation Safety Agency, 2018）。鉴于此，为深入研究自动化程度对飞行中惊奇效应的影响机制，有必要在全动飞行模拟器平台上，借助神经学方法，客观地观察经历惊奇效应时飞行员的情绪变化（Kinney & O’Hare, 2020; 王新野等, 2021）。这将为制定科学的惊奇效应应对方案提供依据，满足以飞行员为中心的飞机自动化设计理念。

参考文献

程妮. (2019). 自动化相关的人为差错分析. 硕士学位论文. 南京航空航天大学.

王新野, 王朔, 林靖康, 杜磊. (2024). 两起波音 737 MAX 空难的致因分析：基于人—自动化交互的 FLAP 模型. *应用心理学, 30*(6), 483-494.

王新野, 李姝, 蔡文皓, 罗扬眉, 游旭群. (2021). 飞行中惊吓和惊奇的管理——拓展的 Landman 模型. *心理科学*, *44*(6), 1432-1439.

许为. (2022). 七论以用户为中心的设计：从自动化到智能化飞机驾驶舱. 应用心理学, 28(4), 291-313.

Ancel, E., & Shih, A. T. (2015). Bayesian Safety Risk Modeling of Human-Flightdeck Automation Interaction. NASA/TM–2015-218791. Washington, DC: NASA.

Billings, C. E. (1996). Human-centered aviation automation: Principles and guidelines. NASA Technical Memorandum No. 110381. Moffett Field, California.

Boeing. (2021). Statistical Summary of Commercial Jet Airplane Accidents. Boeing Commercial Airplanes. Retrieved September, 2021. from http://www.boeing.com/resources/boeingdotcom/company/about_bca/pdf/statsum.pdf.

de Boer, R.J., & Hurts, K. (2017). Automation Surprise. Aviat. Psychol. Appl. *Human Factors 7*, 28–41.

European Aviation Safety Agency. (2018). *Startle effect management*. Report number: NLR-CR-2018-242. Cologne, Germany: European Aviation Safety Agency.

Horstmann, G. (2006). Latency and duration of the action interruption in surprise. *Cognition and Emotion*, *20* (2), 242-273.

International Air Transport Association. (2019). *Loss of Control In-Flight Accident Analysis Report Edition 2019*. Retrieved September, 2021. from https://www.iata.org/contentassets/b6eb2adc248c484192101edd1ed36015/loc-i_2019.pdf

Kinney, L., & O'Hare, D. (2020). Responding to an unexpected in-flight event: Physiological arousal, information processing, and performance. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, *62*(5), 737-750.

Moriarty, D. (2015). Practical human factors for pilots. London, UK: Elsevier.

Musselman, B. T. (2019). Hazards Associated with Human Machine Interface in Part 121 Operations Based on ASRS Reports. International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace, *6*(5).

Parasuraman, R., & Manzey, D. H. (2010). Complacency and bias in human use of automation: An attentional integration. *Human Factors*, *52* (3), 381-410.

Rivera, J., Talone, A. B., Boesser, C. T., Jentsch, F., & Yeh, M. (2014). Startle and surprise on the flight deck: Similarities, differences, and prevalence. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society*, *58*(1), 1047-1051.

Sarter, N. B., Woods, D., and Billings, C. E. (1997). "Automation Surprises," Handbook of Human Factors & Ergonomics, 2nd ed., edited by G. Salvendy, Wiley, New York, NY.

Trippe, J. & Mauro, R. (2015). Understanding Automation Surprise: Analysis of ASRS Reports. Proceedings of the 18th International Symposium on Aviation Psychology, Dayton, Ohio.

Vagia, M., Transeth, A. A., & Fjerdingen, S. A. (2016). A literature review on the levels of automation during the years. What are the different taxonomies that have been proposed? *Applied Ergonomics*, *53*, 190–202.

Wessel, J. R., Jenkinson, N., Brittain, J. S., Voets, S. H. E. M., Aziz, T. Z., & Aron, A. R. (2016). Surprise disrupts cognition via a fronto-basal ganglia suppressive mechanism. *Nature Communications*, *7*, 11195.

Wickens, C. D. (2008). Situation awareness: Review of Mica Endsley's 1995 articles on situation awareness theory and measurement. *Human Factors*, *50*, 397–403.

Woods, D. D., & Hollnagel, E. (2006). Joint cognitive systems: Patterns in cognitive systems engineering. Taylor and Francis. Boca Raton, FL.